

ELABORACIÓN DE PIEZAS METÁLICAS A PARTIR DEL PROCESO DE CERA
PERDIDA E IMPRESIÓN 3D

DIANA LIZETH BOHÓRQUEZ RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2018

ELABORACIÓN DE PIEZAS METÁLICAS A PARTIR DEL PROCESO DE CERA
PERDIDA E IMPRESIÓN 3D

DIANA LIZETH BOHÓRQUEZ RODRÍGUEZ

Trabajo de grado (modalidad proyecto de investigación) para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico

Director

Ph.D. ANDRÉS GIOVANNI GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

Doctor en Materiales Cerámicos

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

Gracias a mis padres, Rafael Bohórquez y Melva Rodríguez, que siempre me inculcaron el amor por el estudio, me formaron como una gran mujer y me enseñaron a nunca rendirme.

Este proyecto también es dedicado a mi hija, Sara Ximena, mi razón de ser, mi impulso para seguir adelante y culminar mis estudios.

A mi esposo Jairo Pacheco, por su amor y apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado y ser mi soporte para terminar la carrera.

A mis hermanos Gustavo y Andrés por confiar en mí y estar siempre a mi lado.

A toda mi familia, que de alguna u otra manera contribuyeron en este anhelo de ser Ingeniera Metalúrgica.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa los siguientes agradecimientos a:

- ◆ Laboratorio de procesos de moldeo y fundición por permitir el uso de las instalaciones y los diferentes equipos para el desarrollo del proyecto.
- ◆ Laboratorio de pirometalurgia por proporcionarme el horno mufla para la elaboración del refractario.
- ◆ Laboratorio de metalografía por el préstamo de los equipos del aula para la preparación y análisis metalográfico.
- ◆ Laboratorio de Microscopia de Confocal digital 3D Hirox, Grupo GIMAT por prestarme sus servicios para la realización del proyecto.
- ◆ Al profesor Jhon Carreño, tutor del SENA por brindarme asesoría en el manejo y práctica de las herramientas CAD.
- ◆ A mi director Andrés González Hernández por su orientación para el desarrollo de este proyecto.
- ◆ A los técnicos Sergio González, Mario, Oscar, Ambrosio, Domingo y Javier por su amabilidad y colaboración en cada uno de los laboratorios.
- ◆ A cada uno de los profesores que me orientaron en mi formación profesional: Ana, Jaime, Sandra, Mauricio, Andrés, Carlos Oviedo, Pedro, Carlos Galán, Sergio, Elcy, Afranio, Liliana, Milton, Julio y Ángel.
- ◆ A todos mis compañeros de carrera; en especial a mis amigos, Yhojan, Néstor, Melissa, Charris, Juanjo, Sergio Luis, Jefferson, Javier Gualdrón y Gabriel.

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN..... | 14 |
| 1. ANTECEDENTES..... | 15 |
| 2. OBJETIVOS..... | 19 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL..... | 19 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 19 |
| 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL..... | 20 |
| 3.1. ELECCIÓN Y DISEÑO DE LA PIEZA EN CAD..... | 20 |
| 3.2. IMPRESIÓN 3D CON PLA..... | 21 |
| 3.3. ELABORACIÓN DEL MOLDE, MODELO EN CERA Y REFRACTARIO... | 22 |
| 3.4. ELABORACIÓN DE LA PIEZA METÁLICA..... | 25 |
| 3.5. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES SUPERFICIALES..... | 25 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 27 |
| 4.1. CAMBIO DIMENSIONAL DE LA PIEZA METALICA RESPECTO A LA IMPRESIÓN 3D Y LA CERA..... | 27 |
| 4.2. ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL A CADA UNO DE LOS MODELOS Y LA PIEZA..... | 31 |
| 4.3. DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA POR ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ÓPTICA DE LA PIEZA METÁLICA... | 34 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.4. | ANÁLISIS METALOGRAFICO DE LA PIEZA METÁLICA..... | 35 |
| 5. | CONCLUSIONES..... | 36 |
| 6. | RECOMENDACIONES..... | 38 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 39 |
| | BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA..... | 41 |
| | ANEXOS..... | 43 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Ciclo de sinterizado para cada yeso. | 24 |
| Tabla 2. Cambio de las medidas de los modelos de PLA y cera, y la pieza metálica respecto al diseño de Solidworks en porcentaje. | 29 |
| Tabla 3. Contracción total del proceso y nuevos valores para las dimensiones del diseño inicial. | 30 |
| Tabla 4. Resultaos comparativos de la rugosidad promedio de cada modelo y la pieza final. | 34 |
| Tabla 5. Resultado de composición química por OES. | 34 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Proceso de cera perdida, (1) Elaboración del modelo de cera, (2) Unión de los modelos al canal de alimentación, (3) Modelos de cera sumergidos en la suspensión cerámica y adición del ligante, (4) Vaciado de la cera y sinterización de la cascarilla cerámica, (5) Vertido del material fundido, (6) Desprendimiento de la cascarilla cerámica por vibración. (7) Acabado final de las piezas, (8) Mediciones de las piezas para control de calidad..... | 16 |
| Figura 2. Impeller seleccionado para el diseño del modelo en 3D. | 20 |
| Figura 3. Modelo de PLA impreso en 3D. | 21 |
| Figura 4. Molde en silicona y modelo impreso 3D. | 22 |
| Figura 5. a) Montaje del modelo en cera sobre la tapa del tambor. b) Sinterizado del yeso en un horno mufla. | 24 |
| Figura 6. Medidas tomadas a cada una de las piezas y zonas donde se midió el perfil de rugosidad..... | 26 |
| Figura 7. Piezas metálicas obtenidas por fundición, izquierda, colada en molde de yeso α , derecha, colada en molde de yeso Advantage. | 27 |
| Figura 8. Comparación de las dimensiones tomadas al modelo impreso en PLA, a la cera y a la pieza metálica, con el diseño inicial de Solidworks (SW). | 28 |
| Figura 9. Perfiles de rugosidad superficial del modelo impreso en PLA a 280x. a) Cara superior, b) Cara superior después de suavizado con resina epóxica. c) Lado-base, d) Lado-base después de suavizado con resina epóxica..... | 32 |
| Figura 10. Perfil de rugosidad superficial de la pieza metálica final a 280x. a) Cara superior y b) lado-base..... | 33 |
| Figura 11. Micrografía de la pieza metálica final a 140x..... | 35 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---|----|
| Anexo A. Plano de la pieza modelada en solidworks 2017. | 43 |
| Anexo B. Ficha técnica de la cera. | 44 |
| Anexo C. Resultado de las medidas de las dimensiones del modelo en PLA, la cera y la pieza metálica. | 45 |
| Anexo D. Diagramas binarios de los sistemas Al-Cu, Al-Zn, Cu-Zn y sección isotérmica del sistema ternario Al-Cu-Zn a 350 °C [14]. | 46 |
| Anexo E. Perfil de rugosidad superficial para el modelo en Cera a 280x. a) Cara superior y b) lado-base. | 47 |

RESUMEN

TÍTULO: ELABORACIÓN DE PIEZAS METÁLICAS A PARTIR DEL PROCESO DE CERA PERDIDA E IMPRESIÓN 3D

AUTORES: Bohórquez Rodríguez, Diana Lizeth **

PALABRAS CLAVES: Cera perdida, Fundición, PLA, Impresión 3D.

DESCRIPCIÓN: La impresión 3D ha tenido una gran acogida en los últimos años y por eso se ha integrado a sistemas de producción como los procesos de fundición. La elaboración del molde y la inyección de cera son las operaciones más costosas durante el proceso de cera perdida. En el presente trabajo, dichas operaciones se remplazaron con el diseño e impresión 3D y con la producción de los modelos de cera a partir de un molde de silicona. El metal se vertió en un molde yeso para obtener la pieza final y se evaluaron la geometría y rugosidad a los diferentes modelos obtenidos, así como los cambios dimensionales generados por las contracciones durante cada etapa de producción. Se logró una pieza metálica con un perfil de rugosidad suave y apta para la elaboración de otros modelos y de la pieza final (metálicas). La técnica de prototipado rápido basada en la impresión 3D demostró ser eficaz para la producción de prototipos con diseños complejos en poco tiempo. El trabajo concluye que hay una alta influencia de la dirección de impresión en la rugosidad de la pieza impresa en PLA, ya que se logra una superficie más lisa cuando se trata de superficies paralelas a la dirección de impresión. La contracción total del proceso desde su impresión en 3D hasta la obtención de la pieza metálica fue aproximadamente del 3%.

*Proyecto de grado (modalidad, proyecto de investigación)

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: PhD. Andrés Giovanni González.

ABSTRACT

TITLE: PRODUCTION OF METAL PIECES FROM THE PROCESS OF LOST WAX AND 3D PRINTING*

AUTHORS: Bohórquez Rodríguez, Diana Lizeth**

KEYWORDS: Lost wax, Casting, PLA, 3D Printing.

DESCRIPTION: 3D printing has been a great success in recent years, that's why it has been integrated to production systems such as casting processes. Mould making and injection of wax are the more expensive operations during the investment casting process. On this thesis, these operations are replaced with the design, 3D printing and the production of wax models from a silicone mould. The metal was poured into a plaster mould to get the final piece. Geometry and roughness were evaluated in all the different models and the dimensional changes generated for the contractions in each step of the production. A metal piece was obtained with the required profile (soft roughness) and suitable for the elaboration and production of new models and mainly the final piece (metal). The technique of rapid prototyping based on 3D printing proved to be effective for the production of prototypes with complex designs in a short time. This thesis concluded that there is a high influence of the direction of printing in the roughness of the printed piece in PLA, since it achieved a smoother surface when it comes to surfaces parallel to the direction of printing. The full contraction of the process from your 3D printing until obtained the piece of metal was approximately 3%.

*Degree project (modality, research project)

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Adviser: PhD. Andrés Giovanni González

INTRODUCCIÓN

La fundición de metales para la elaboración de piezas es un proceso de fabricación que se ha practicado durante más de 5000 años y la fundición a la cera perdida (investment casting) es uno de los métodos más usados desde la antigüedad para producir componentes con alta precisión dimensional y formas complejas. Este proceso consiste en inyectar cera líquida en un molde metálico, el cual adquirirá la forma deseada al solidificarse. Luego el componente en cera (modelo) se recubre con varias capas de polvo cerámico y ligante hasta tener la resistencia en verde ideal. Posteriormente, la cera se derrite por medio de un horno o autoclave para formar una cascarilla, que luego se sinteriza para formar el molde y finalmente se precalienta para verter el metal líquido y obtener las piezas deseadas [1]. La fabricación del molde y la inyección de la cera son las operaciones más costosas en todo el proceso de cera perdida debido a la robustez de la inyectora y al tiempo empleado para crear los moldes metálicos.

La impresión 3D ha tenido una gran acogida en los últimos años y por eso se ha integrado a sistemas de producción como los procesos de fundición. Específicamente, la elaboración de los modelos de cera en el proceso de cera perdida está siendo realizada por el método de la impresión 3D y así se hace más económico al reemplazar las costosas máquinas de inyección de cera [2]. Con base a lo anterior, en este proyecto de investigación se quiere desarrollar e implementar la utilización de la impresión 3D para elaborar los modelos en cera e integrarlos al proceso de fundición de precisión y evaluar las características superficiales como geometría y rugosidad a las piezas obtenidas. Además, con el proyecto se desea incentivar la línea de investigación en nuevos materiales y sus procesos de fabricación de metales, dentro del Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales - GIMAT, así como implementar su uso en el laboratorio de fundición, para futuras modernizaciones.

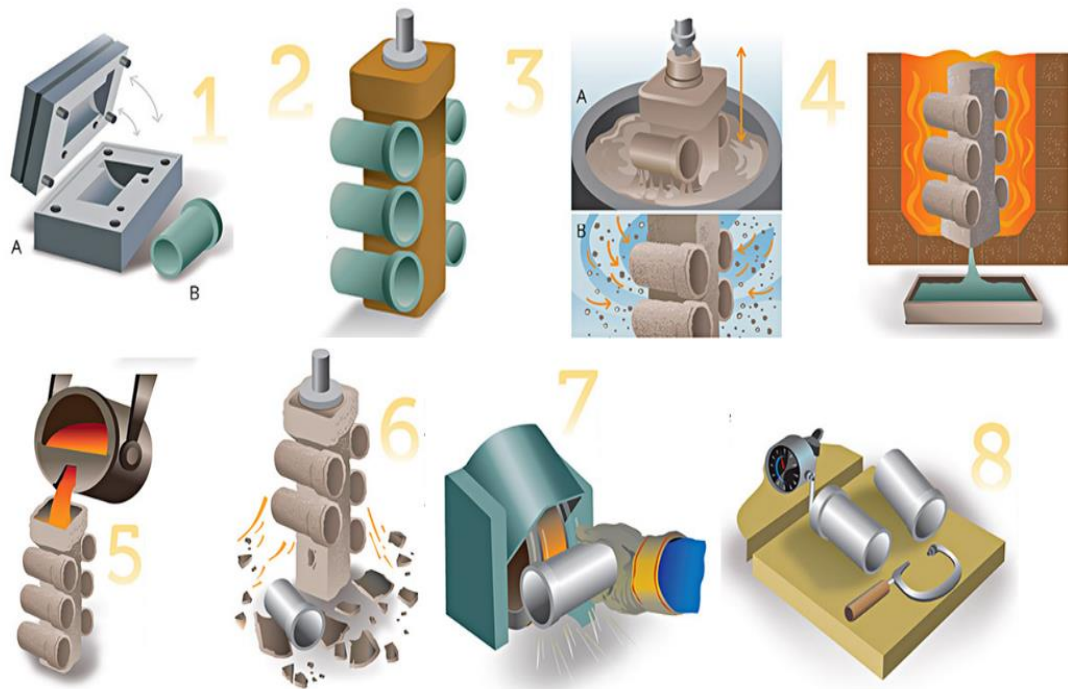
1. ANTECEDENTES

La fundición en cera perdida es un proceso ampliamente utilizado durante siglos, capaz de producir componentes de excelente acabado superficial, precisión dimensional y formas complejas. Los avances tecnológicos también han hecho que sea el más moderno y versátil entre los procesos de fundición de metales [3].

Esta técnica consiste en hacer un patrón de la forma deseada, por medio de inyección de cera fundida en un molde metálico. Posteriormente estos modelos se unen a un canal de cera central y se sumergen en una suspensión cerámica o refractaria, que luego se solidifica para formar una cascarilla alrededor del patrón o modelo. Después, en un horno o autoclave se retira la cera dejando el vacío que coincide exactamente con la forma de los patrones, así formando la cascarilla cerámica que es llevada nuevamente al horno para sinterizarla y eliminar cualquier resto de cera restante. Finalmente, se llena la cascara con el metal fundido y después de que solidifique se rompe la cascarilla por medio de vibración para obtener la pieza con la forma deseada [4], tal como se muestra en la figura 1.

La tecnología del prototipado rápido (o impresión 3D) se ha estado usando durante los últimos 20 años en la industria de la fundición para el desarrollo de nuevos materiales y mejoras en los procesos de fabricación, debido a que permite la producción de piezas con geometrías complejas en poco tiempo y sin uso de moldes metálicos. La clave del prototipado rápido es la conexión directa que hay entre el modelo de CAD en 3D y los objetos sólidos, permitiendo fabricar piezas en poco tiempo con cada una de las medidas que el cliente requiera o partes únicas. En este proceso se parte de la construcción de un modelo computacional usando herramientas como los sistemas de diseño y manufactura CAD/CAM.

Figura 1. Proceso de cera perdida, (1) Elaboración del modelo de cera, (2) Unión de los modelos al canal de alimentación, (3) Modelos de cera sumergidos en la suspensión cerámica y adición del ligante, (4) Vaciado de la cera y sinterización de la cascarilla cerámica, (5) Vertido del material fundido, (6) Desprendimiento de la cascarilla cerámica por vibración. (7) Acabado final de las piezas, (8) Mediciones de las piezas para control de calidad.



El modelo construido debe estar definido por un volumen limitado, luego este se convierte en un archivo de formato STL (Standard Triangle Language). Este formato aproxima la superficie del modelo por medio de polígonos para llegar al objeto real. Finalmente, la impresora fabrica la pieza construyéndola capa por capa formando así el modelo en tres dimensiones por solidificación de líquidos o polvos según la técnica de prototipado que se use. Los rangos de las capas están entre 25 a 250 micrómetros [4,5] y esto tiene gran influencia en su acabado superficial.

El modelado por deposición fundida (FDM) es una de las técnicas que más se usan para la impresión 3D. Esta técnica consiste en una boquilla controlada por computadora, la cual guía el material y lo funde por calor distribuyéndolo a lo largo de los tres ejes, depositándose en capas súper delgadas. Es importante tener en cuenta que la temperatura del material líquido debe estar justo por encima del punto de fusión ya que este endurece de forma inmediata a temperatura ambiente. El “*Markerbot*” es uno de los métodos más comunes de impresoras, se basa en un plano fijo X y Y (cabeza de impresión) y móvil Z (cama de impresión). Otro de los tipos de impresora es el “*RepRap*” que se basa en un eje X plano fijo, mientras que el eje Y se controla moviendo la propia cama de impresión y el eje Z se logra moviendo verticalmente todo el sistema de cabezal de impresión hacia arriba [5,6].

El componente principal para las impresoras FDM es usualmente un termoplástico que se provee en forma de alambre. Los diámetros más comunes son 1,75 mm y 3 mm para dicho alambre y el diámetro específico es requerido por el cabezal de la impresora. El polímero de ácido poliláctico (PLA) es el segundo componente más común para FDM, es un bioplástico, hecho de maíz, remolacha o papa y es biodegradable por la acción bacteriana en un corto período de tiempo sin dejar residuos visibles y tóxicos. Se funde a una temperatura más baja que el acrilonitrilo butadieno estireno ABS (150°-160° C) y debido a esto no es adecuado para usos que involucran altas temperaturas y luz solar directa. El PLA es cristalino y se agrieta más fácilmente que el ABS; sin embargo, también es muy usado ya que no requiere de una cama de impresión calentada para promover la adhesión y evitar el choque térmico, lo que reduce el precio de las impresoras que lo utilizan. El PLA es más estable térmicamente durante la impresión y no es necesario aislar del ambiente a la impresora como con el ABS. Otra ventaja del PLA es que no genera mal olor y gases al fundir y se encuentra en una gran variedad de colores incluyendo unos brillantes en la oscuridad [6,7].

Por otro lado, la técnica de impresión FDM fue desarrollada por Crump en 1992, pero hasta el 2009 fue patentada y conocida comercialmente. Uno de los proyectos de impresoras 3D de bajo costo más conocido fue desarrollado en el 2005 por el Dr. Adrian Bowyer, de la Universidad de Bath en Reino Unido y es conocido como el proyecto de prototipo rápido de replicación (RepRap). En el 2012, el profesor Ingeniero Milan Horáček y M. Macků se centraron en investigar la producción de prototipos para la fundición de precisión y su principal objetivo fue descubrir los cambios dimensionales que ocurren durante la etapa de producción individual, desde la impresión del modelo en 3D hasta la colada final, realizando una serie de pruebas a las piezas obtenidas [8].

La cera “Freeman Flakes” para inyección ha sido estándar de calidad y consistencia durante 40 años, es reconocida por su alta definición en la geometría del patrón, solidificación rápida, baja contracción, excelente fluidez y bajo contenido de ceniza (.003%) que permite el descerado más limpio y la reproducibilidad más precisa. La cera “Aqua Green” es una formula multipropósito, que proporciona un balance ideal en las características que demandan la mayoría de los diseñadores. Aqua Green ofrece una excelente fluidez y flexibilidad para inyectar modelos intrincados. Tiene una contracción mínima para la inyección en modelos grandes y es recomendada para la fundición de gemas o piedras preciosas pre-engastadas [9].

El polvo cerámico ADVANTAGE BANDUST es una de las tecnologías más usadas por Ransom & Randolph para la fundición de aleaciones de baja temperatura como la plata, el latón y bronce; es una alternativa económica que reduce el exceso de defectos en el metal y las marcas de agua para obtener fundiciones confiables y con máximos beneficios [10].

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Elaborar piezas metálicas a partir del proceso de cera perdida e impresión 3D.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ◆ Diseñar una pieza con herramientas CAD.
- ◆ Elaborar el modelo de cera a partir de la impresión 3D obtenida.
- ◆ Evaluar la geometría y rugosidad de la pieza metálica obtenida por medio del proceso de fundición de precisión e impresión 3D.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. ELECCIÓN Y DISEÑO DE LA PIEZA EN CAD

Actividad 1. Revisión bibliográfica

Se revisaron varias fuentes bibliográficas con el fin de seleccionar una pieza de geometría compleja, que requiriera de un diseño detallado y tuviera un uso industrial, para verificar la posibilidad de aplicar un método de prototipado rápido en la producción de fundiciones. Se seleccionó un impeller o rodete con aspas inclinadas (Ver figura 2), usado como impulsor centrífugo en las turbinas de gas; que dependiendo de su entorno deben ser resistentes a la oxidación, al calor y soportar una gran cantidad de esfuerzos.

Figura 2. Impeller seleccionado para el diseño del modelo en 3D.



Actividad 2. Diseño de la pieza en Solidworks

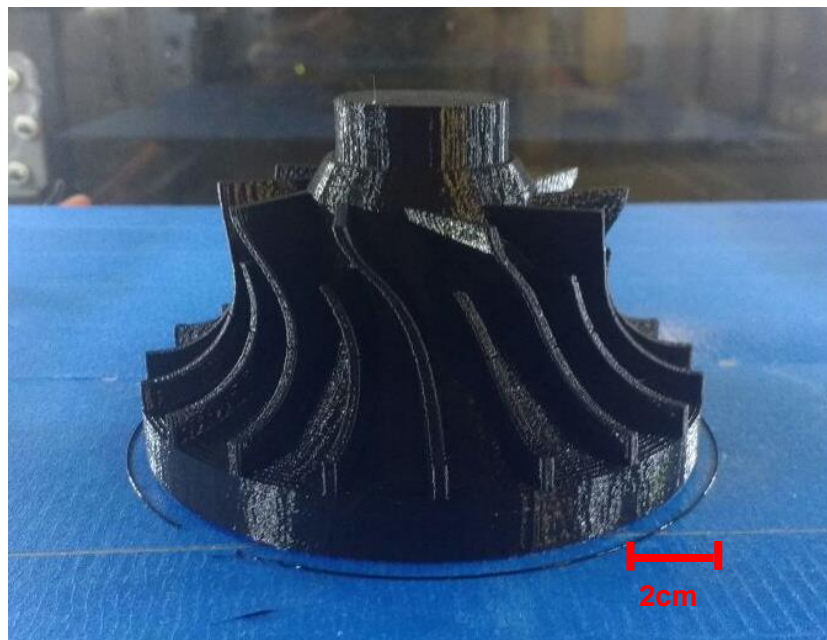
El impeller se diseñó en el software de modelado o de diseño asistido por computadora (CAD) Solidworks 2017, bajo las condiciones descritas en el anexo A. El diseño terminado se cambió al formato STL para que la impresora 3D procesará los datos del dibujo CAD. Dicho formato divide el modelo 3D en una

gran cantidad de áreas pequeñas con forma de triángulo cubriendo toda la superficie del patrón. Pueden existir errores de conexión de puntos individuales al cambiar el modelo 3D al formato STL, que el dispositivo detectaría como una parte libre y no se imprimiría. Se debe verificar la corrección de la conversión al formato STL y corregir si hay algún error.

3.2. IMPRESIÓN 3D CON PLA

El modelo se elaboró en la impresora Voxel BGC de Smart Tech modificando unos parámetros de impresión como la altura de capa a 0,2 mm y 20% de densidad de relleno para reducir el tiempo de impresión. El material usado en el cabezal de aporte fue ácido poliláctico (PLA) de diámetro 1,75 mm, con una temperatura de quemado de 200 °C y 70 °C para la cama de impresión. El tiempo total para la obtención del modelo impreso en 3D fue de 10 horas 30 minutos (Ver figura 3).

Figura 3. Modelo de PLA impreso en 3D.



La impresión de capas individuales y la pausa que se tuvo que hacer, debido al rompimiento del material causaron irregularidades en la superficie del patrón, que se suavizaron aplicando una capa de resina epóxica (EpoxiCure).

3.3. ELABORACIÓN DEL MOLDE, MODELO EN CERA Y REFRACTARIO

Actividad 1. Elaboración del molde en silicona

Para la producción del molde se usó una silicona Mold Max 25 de Smooth-ON, mezclando un componente A de base y un componente B como catalizador en proporción 100A:5B durante 3 minutos, los gases atrapados se eliminaron al vacío durante 3 minutos a una presión de 27 inHg y se vertió homogéneamente sobre el modelo en PLA. Este proceso tuvo una duración de 24 horas curando y se hizo en dos partes para desmoldar fácilmente las piezas (Ver figura 4).

Figura 4. Molde en silicona y modelo impreso 3D.



Actividad 2. Elaboración del modelo en cera

Los modelos en cera se hicieron con 225 g de cera Aqua Green de “Freeman Flakes” para cada uno, a una temperatura de fusión de 95 °C por una hora y posteriormente se disminuyó a 85 °C por 30 minutos para luego verterla en el molde de silicona. El molde se lubricó con silicona en spray para evitar la adherencia de la cera fundida en el molde. Después de la colada permaneció por 4 horas a temperatura ambiente para su enfriamiento (Características de la cera anexo B).

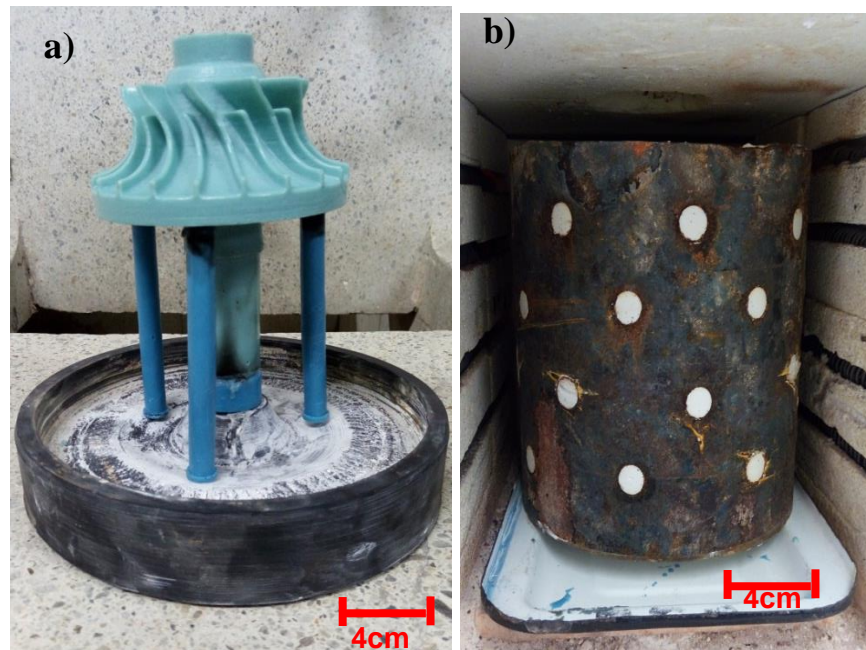
Actividad 3. Refractario en yeso

Se usaron dos mezclas de yeso diferentes, para comparar las características de acabado superficial. La primera se basó en el sistema americano que consiste en cubrir la cera con una mezcla homogénea de 1 parte de chamote, 1 de arena sílice (tamizada por malla 270), y 1 parte de yeso alfa, adicionando un 40% de agua. Se pinceló la cera, formando una capa de contacto para permitir una mayor adhesión del material refractario de respaldo, que se hizo mezclando 2200 g de yeso alfa con 1200 g de talco y 40% de agua.

La preparación de la segunda mezcla fue con 4 Kg de yeso Advantage BANDUST de Ramson & Randolph y 1750 ml de Agua. Se agregó poco a poco el polvo al agua para evitar grumos y se mezcló constantemente con una batidora para mayor homogeneidad.

Inmediatamente realizadas las mezclas, se vertieron en un tambor donde ya estaba el montaje del modelo en cera con su respectivo canal de alimentación y de emisión de gases como se puede observar en la figura 5. Esta mezcla fraguó por 2 horas.

Figura 5. a) Montaje del modelo en cera sobre la tapa del tambor. b) Sinterizado del yeso en un horno mufla.



Después del fraguado se procedió a sinterizar el yeso, para descercar, eliminar la humedad y prepararlo para la temperatura de colada del metal. Los ciclos del tratamiento térmico del yeso se hicieron en un horno mufla y se pueden observar en la tabla 1.

Tabla 1. Ciclo de sinterizado para cada yeso.

| | Yeso Alfa | Yeso Advantage |
|-----------------------------------|------------------|-----------------------|
| Descerado | 150 °C – 2 horas | 150 °C – 3 horas |
| Transición térmica | 320 °C – 2 horas | 370 °C – 2 horas |
| Sinterizado | 640 °C – 3 horas | 750 °C – 3 horas |
| Reducción y estabilización | 610 °C – 1 hora | 550 °C – 2 horas |

Estos tratamientos térmicos se realizan no solo con el fin de preparar el molde para la colada, sino para sinterizar el yeso de tal manera que pase lentamente por las temperaturas en que cambia de fase.

3.4. ELABORACIÓN DE LA PIEZA METÁLICA

El material utilizado para la fabricación de la pieza fue una aleación base cobre suministrada por el laboratorio de fundición. Se precalentó el horno de crisol, usando como fundente borato de sodio y vidrio molido; a una temperatura de fusión de 1100°C. El refractario sinterizado se sacó del horno mufla para realizar la colada del metal fundido y después de haber vertido el metal se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 12 horas.

Por medio de vibración se rompió el refractario para obtener las piezas metálicas, a las cuales se le hizo un lavado a presión para retirar todo el yeso de las partes más profundas.

3.5. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES SUPERFICIALES

Actividad 1. Medición de la geometría final de la pieza

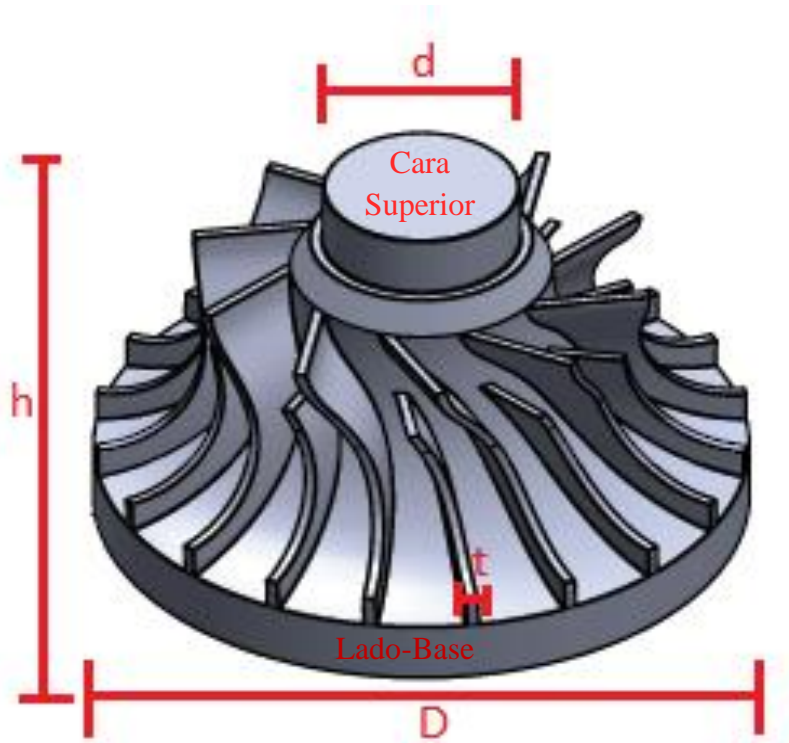
La medición de las dimensiones de la pieza, se hizo durante todo el proceso de producción al patrón impreso en 3D, al modelo en cera y a la pieza metálica, con un calibrador digital de resolución 0,01 mm.

Se realizaron 4 mediciones, d para el diámetro menor, D diámetro mayor, h altura de la pieza y t el espesor de las aspas inclinadas, como se observa en la figura 6.

Actividad 2. Medida de la rugosidad superficial.

Se realizaron mediciones de rugosidad a la cara superior de la pieza y al lado de la base (Ver figura 6), para todos los procesos usados en este trabajo como fueron: el modelo impreso en PLA, el cubierto con la capa de resina epóxica, el modelo en cera obtenido del molde de silicona y a la pieza metálica final. Todas las rugosidades fueron medidas mediante el equipo de Microscopia Confocal Hirox.

Figura 6. Medidas tomadas a cada una de las piezas y zonas donde se midió el perfil de rugosidad.



Actividad 3. Caracterización y análisis químico

La pieza metálica obtenida, se caracterizó en el equipo de Microscopia Confocal Hirox, realizando previamente una preparación metalográfica a la probeta cortada del canal de alimentación, desbastando desde la lija 240 hasta la 1500 y puliendo en paños con alúmina de $1\ \mu\text{m}$ y $0,5\ \mu\text{m}$, como lo establece la norma ASTM E3 [11]. Para revelar su microestructura se hizo un ataque químico con cloruro ferrico al 10% por 23 segundos según norma ASTM E407 [12]. Posteriormente se les realizó un análisis químico por espectroscopia de emisión óptica (OES) para determinar la composición de la aleación, en el equipo Q8 Magellan Bruker con el método de cuantificación o canal para cobre.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CAMBIO DIMENSIONAL DE LA PIEZA METALICA RESPECTO A LA IMPRESIÓN 3D Y LA CERA

Las mediciones del cambio dimensional se realizaron a la pieza metálica (Anexo C) obtenida en el molde de yeso Advantage porque fue la que cumplió con una superficie más suave y con un mejor llenado de la pieza, tal como se puede comparar en la figura 7.

Figura 7. Piezas metálicas obtenidas por fundición, izquierda, colada en molde de yeso α , derecha, colada en molde de yeso Advantage.

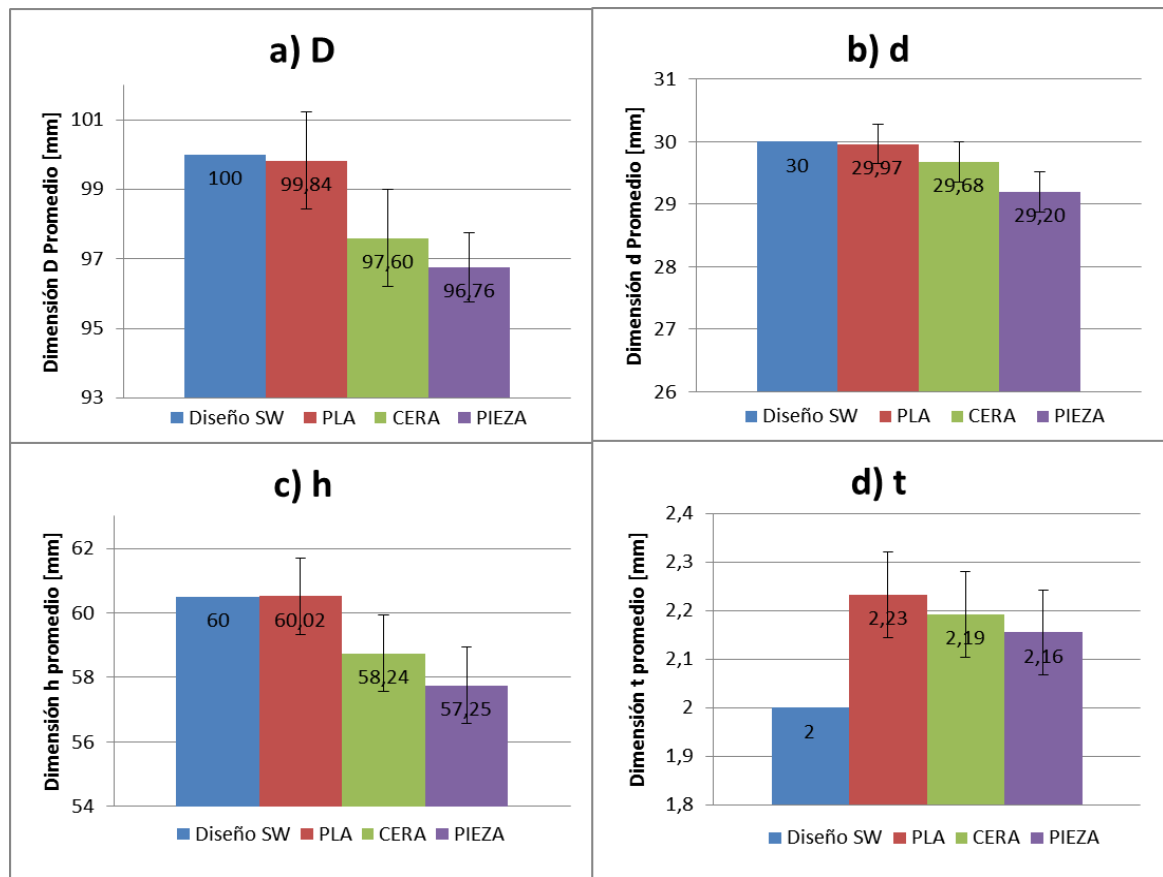


En la figura 8, se muestra una comparación de las medidas D , d , h , t de todos los modelos elaborados en el proceso de acuerdo a lo descrito en la figura 6. En esta figura se evidencia que las medidas tuvieron una disminución en cada etapa del proceso, como consecuencia de las contracciones que se generan al solidificarse cada uno de los materiales utilizados; a excepción de la dimensión t (Ver Figura

8d). Esta medida del espesor de las aspas (t) tuvo un incremento de 0,23 mm en el modelo de PLA con respecto al diseño de Solidworks, expansión que se atribuye a la forma de deposición de material de la maquina impresora, que va derritiendo capa por capa individualmente, y a la inclinación de las aspas.

Otro valor importante de la figura 8, es que el mayor cambio dimensional se muestra entre el modelo PLA y la cera especialmente en las medidas de D, d y h, lo que es generado debido a la solidificación de la cera dentro del molde de silicona.

Figura 8. Comparación de las dimensiones tomadas al modelo impreso en PLA, a la cera y a la pieza metálica, con el diseño inicial de Solidworks (SW), a) D diámetro mayor, b) d diámetro menor, c) h altura de la pieza, d) t el espesor de las aspas inclinadas.



Los cambios dimensionales que tuvieron cada uno de los modelos y la pieza final durante todo el proceso de fabricación, se compararon con el diseño anterior de su proceso. De esta manera, se calculó la diferencia y el cambio porcentual de cada medida como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Cambio de las medidas de los modelos de PLA y cera, y la pieza metálica respecto al diseño de Solidworks en porcentaje.

| Dimensión (mm) | Diseño SolidWorks (mm) | PLA (mm) | PLA % | Cera (mm) | Cera % | Pieza (mm) | Pieza % |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| D | 100 | -0,17 | 0,17 | -2,24 | 2,24 | -0,84 | 0,86 |
| d | 30 | -0,04 | 0,12 | -0,29 | 0,95 | -0,48 | 1,62 |
| h | 60 | -0,02 | 0,03 | -1,78 | 2,96 | -0,99 | 1,70 |
| t | 2 | +0,23 | 11,63 | -0,04 | 1,79 | -0,03 | 1,71 |

Generalmente la tolerancia del cambio dimensional de una pieza fabricada por fundición no debe superar el 2% de acuerdo a la norma ISO 286-1[13]. La tolerancia para la medida de las dimensiones del PLA es aceptable, ya que no supera el 1%, excepto por el espesor de las aspas que por el contrario sufre una dilatación (t).

La cera tuvo una reducción considerable en dos de sus dimensiones: el diámetro mayor (D) de 2,24 mm y la altura (h) en 1,78 mm debido a que es la última parte en solidificarse en el modelo, por consiguiente, es la que se ve afectada por la contracción de la cera.

La contracción en la pieza metálica, aunque no supera el 2%, se ocasiona por el tipo de aleación utilizada y por la colada del metal fundido, la cual se hizo en caída libre.

En la tabla 3 se muestra la contracción total que se da durante el proceso, el cual se calculó sumando la diferencia en porcentaje de cada etapa del proceso (Ver tabla 2). El cambio total en las dimensiones fue mayor al 2%, razón por la cual es necesario modificar las medidas iniciales del diseño en Solidworks, añadiendo la contracción total hallada, a los valores iniciales.

Tabla 3. Contracción total del proceso y nuevos valores para las dimensiones del diseño inicial.

| Dimensión | Diseño Inicial (mm) | Contracción total (mm) | Contracción Total % | Nuevo Diseño |
|------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------|
| D | 100 | 3,24 | 3,26 | 103,2 |
| d | 30 | 0,80 | 2,69 | 30,8 |
| h | 60 | 2,79 | 4,69 | 62,8 |
| t | 2 | 0,08 | 3,50 | 2,1 |

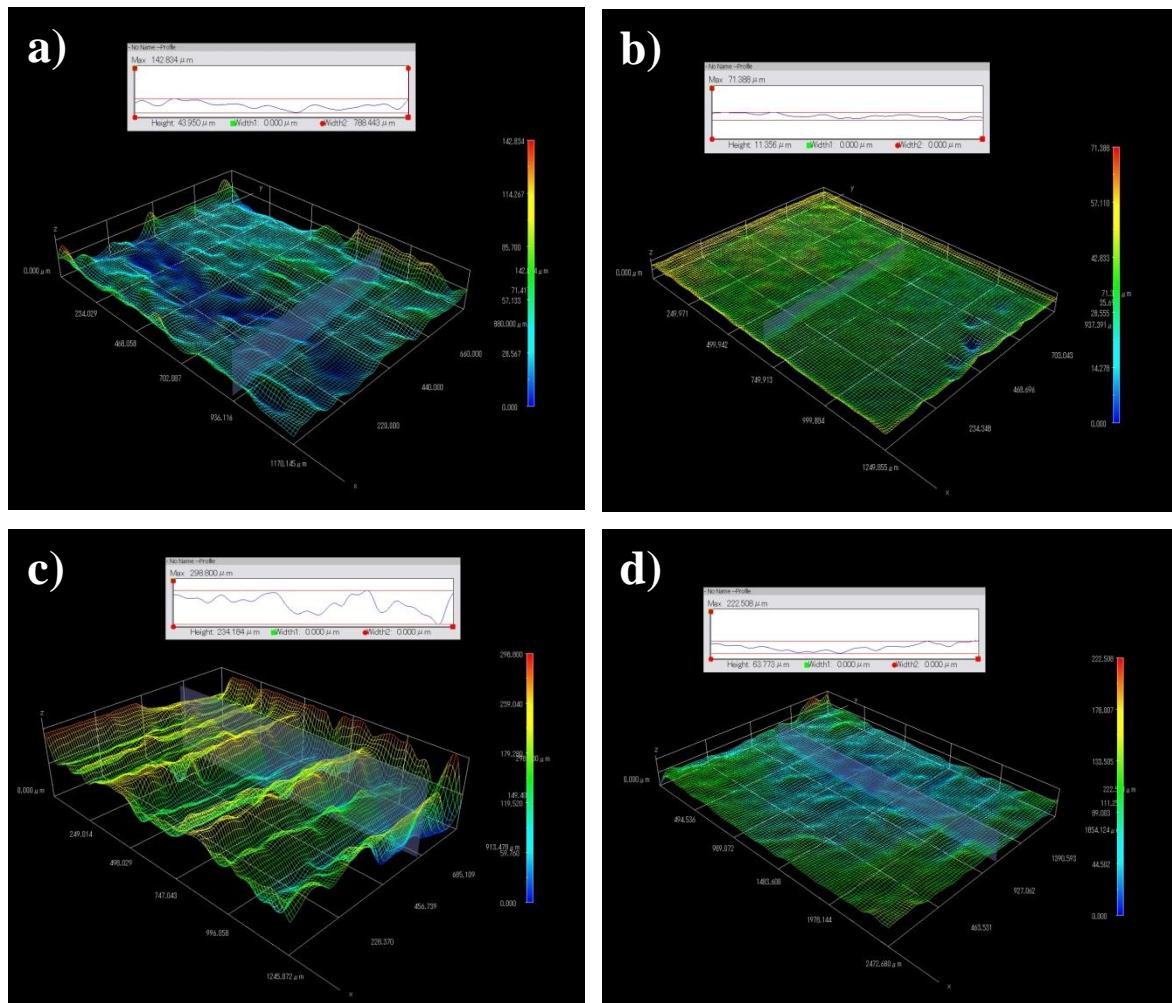
4.2. ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL A CADA UNO DE LOS MODELOS Y LA PIEZA.

Los resultados de las mediciones de la rugosidad para el modelo impreso en 3D que se realizaron antes y después de aplicarle la capa epóxica para suavizar su superficie, se muestran en la figura 9. La aplicación de esta capa epóxica se realizó con el objetivo de mejorar el acabado superficial ya que para tener una mejor superficie en la impresión 3D requeriría mucho más tiempo de impresión y generaría muchos más costos. Se planteó este proceso para mejorar lo mencionado y se estudia la rugosidad para ver su cambio.

En el perfil de rugosidad de la cara superior del modelo en PLA (Ver figura 9a) se logra apreciar una pequeña irregularidad superficial, debida a que el PLA se deposita en forma paralela a la cama de impresión. Comparando estos resultados con la superficie “lado-base” se muestra gran irregularidad tal como se observa en la figura 9c. Este fenómeno ocurre porque su construcción se hace en forma perpendicular a la cama de impresión. Las crestas y valles de la superficie que se observan en el perfil corresponden y tienen una gran relación con las capas depositadas de PLA, donde el espacio entre cresta y cresta es de 200 μm (parámetro especificado en el software de la impresora).

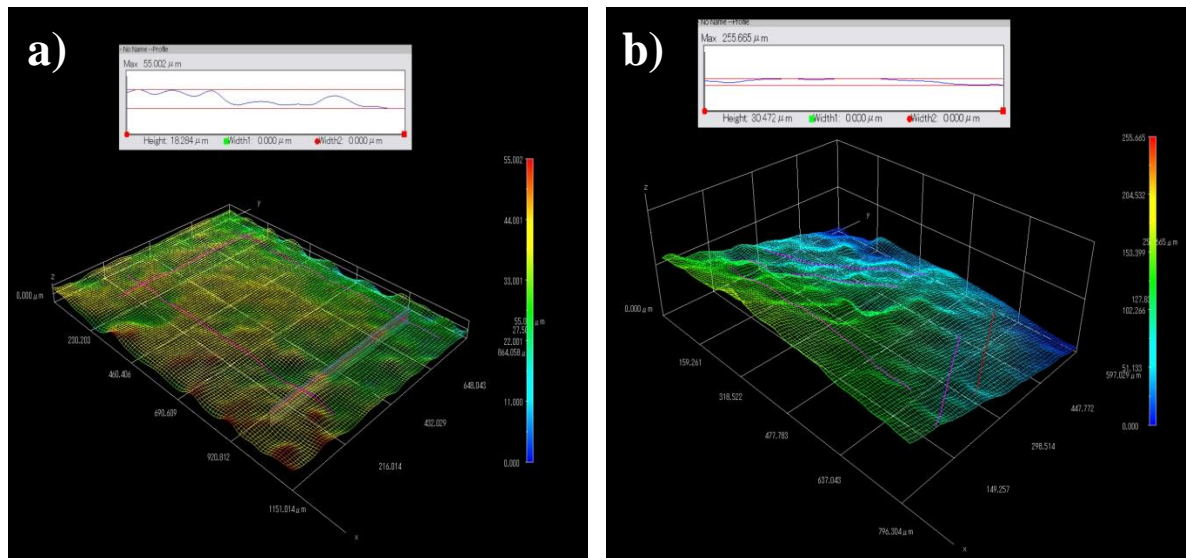
Después de aplicada la capa epóxica sobre todo el modelo impreso, es evidente el cambio de la rugosidad en la superficie ya que en la cara superior del modelo en PLA (figura 9b) se logra observar una superficie más suave con mínimas irregularidades en el perfil. Esto mismo ocurre en la parte “lado-base” del modelo, donde se ve que el perfil de rugosidad se vuelve más uniforme (ver figura 9d), comparado con el inicial (figura 9c).

Figura 9. Perfiles de rugosidad superficial del modelo impreso en PLA a 280x. a) Cara superior, b) Cara superior después de suavizado con resina epóxica. c) Lado-base, d) Lado-base después de suavizado con resina epóxica.



En la figura 10a se muestra el perfil de rugosidad de la pieza metálica final. Se observa que se mantuvo la uniformidad de la superficie suavizada en la pieza metálica comparada con el modelo en PLA+resina epóxica o cera. El lado-base presenta una inclinación (figura 10b) debido a la contracción que se dio durante la solidificación; pero aun así mantuvo una superficie regular y menor que la producida en el modelo de cera (Anexo E).

Figura 10. Perfil de rugosidad superficial de la pieza metálica final a 280x. a) Cara superior y b) lado-base.



En la tabla 4 se muestra un resumen de las rugosidades obtenidas de los perfiles medidos anteriormente. El valor de rugosidad para el “lado-base” de 51,2 μm del PLA + Epóxica comparado con el inicial del PLA de 215,9 μm; es un dato que nos confirma que la mejora de suavizar la superficie con la resina epóxica, si fue efectiva en la homogeneidad del perfil superficial. Además, se evidencia con valores la diferencia en la superficie de las piezas en cuanto a la impresión paralela (rugosidad 37,9 μm) con respecto a la superficie impresa perpendicular a la cama de impresión (rugosidad 215,9 μm). Es importante resaltar que la medida vertical de la rugosidad del modelo impreso en PLA (215,9 μm), es la que presentó la mayor rugosidad debido a la construcción que se realiza en la impresora capa por capa.

Tabla 4. Resultaos comparativos de la rugosidad promedio de cada modelo y la pieza final.

| Rugosidad Promedio (μm) | | | | |
|--|---------------------------------------|---|--|--|
| | PLA (μm) | PLA + Epóxica (μm) | Cera (μm) | Pieza Metálica (μm) |
| Cara Superior | 37,9 | 20,2 | 18,2 | 15,8 |
| Lado-base | 215,9 | 51,2 | 33,2 | 31,1 |

En general, durante todo el proceso de fabricación, la rugosidad fue disminuyendo tanto para el modelo en cera (18,2 cara superior y 33,2 μm lado-base) como para la pieza metálica (15,8 cara superior y 31,1 μm lado-base), obteniendo así una pieza con superficie más suave y apta para la elaboración de otros modelos y de la pieza final.

4.3. DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA POR ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ÓPTICA DE LA PIEZA METÁLICA.

Los resultados del análisis químico para la pieza obtenida por fundición se presentan en la tabla 5, donde se aprecia que los elementos principales en la composición de la pieza metálica son: 87,83% cobre (Cu), 6,095% de aluminio (Al) y 5,667% cinc (Zn).

Teniendo en cuenta que las aleaciones comerciales de latón se caracterizan por tener entre un 30-45% de cinc, y las aleaciones de cuproaluminio contienen hasta un 12% de aluminio, se deduce que la pieza metálica presenta una composición similar a un cuproaluminio pero con elemento aleante de cinc; de acuerdo a los resultados de composición química de la tabla 5.

Tabla 5. Resultado de composición química por OES.

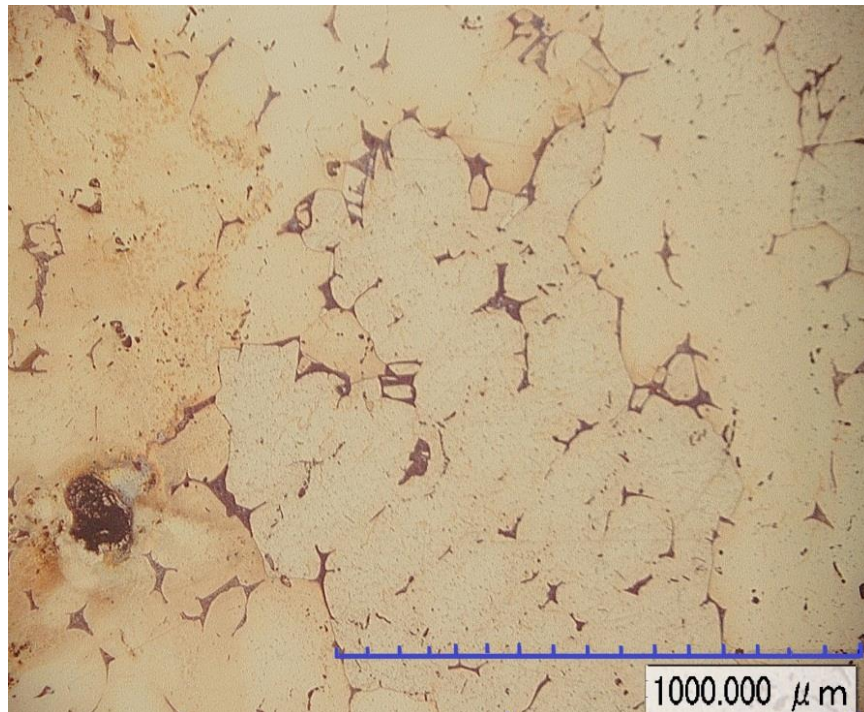
| %Cu | %Zn | %Al | %Si | %P | %Mn | %Fe | %Sn | %S | %As | %Sb |
|--------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|
| 87,83 | 5,667 | 6,095 | 0,132 | 0,0017 | 0,0025 | 0,064 | 0,0038 | 0,0012 | 0,0027 | 0,011 |

4.4. ANÁLISIS METALOGRAFICO DE LA PIEZA METÁLICA.

La microestructura revelada en la probeta muestra un crecimiento dendrítico característico de la fundición por colada y del enfriamiento lento. En la figura 9 se observa una estructura monofásica de fase α rica en cobre, y un peritético (parte oscura) presente en los bordes de las dendritas. El peritético se identifica de acuerdo al diagrama ternario Al-Cu-Zn (Ver anexo D).

La microestructura de fase α que se presenta en la figura 11, confirma que la pieza metálica es un cuproaluminio. El contenido de cinc (ver Tabla 5) pudo haberse añadido debido a que el material empleado para la fundición era reciclado.

Figura 11. Micrografía de la pieza metálica final a 140x.



5. CONCLUSIONES

Se elaboraron piezas metálicas a partir del proceso de cera perdida e impresión 3D y se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- ◆ Se logró obtener una pieza metálica con una rugosidad superficial uniforme, gracias a la capa de resina epóxica aplicada al modelo impreso en 3D, a la capacidad de copia del molde en silicona, a la utilización de una cera adecuada y a la selección de un yeso de calidad para la fabricación del refractario que mantuviera todos los detalles del diseño.
- ◆ La rugosidad de la impresión 3D está influenciada altamente por la dirección de deposición de material con respecto a la cama de impresión, es decir, se obtuvieron rugosidades más bajas en partes de la pieza de PLA donde la cara era paralela a la cama de impresión.
- ◆ El tiempo desde el diseño del modelo en solidworks hasta su obtención en cera fue aproximadamente de una semana gracias a las herramientas CAD, en este caso usando Solidworks e impresión 3D se obtuvo un modelo de bajo costo de producción en comparación con el método convencional de fundición por cera perdida (inyección).
- ◆ La silicona usada para hacer el molde reprodujo hasta el mínimo detalle del modelo impreso en 3D, pero el modelo de cera que se coló en el molde de silicona no obtuvo esa misma reproducción, como se pudo apreciar en las medidas D y h que tuvieron una reducción comparadas con el modelo en PLA. Este cambio en las dimensiones D y h pudo haberse dado por el choque térmico, la contracción y la solidificación que se ocasiona al verter la cera

derretida (85°C), como se pudo evidenciar en las medidas anteriormente descritas del PLA+epóxica y el modelo en cera.

- ◆ Es posible implementar la impresión 3D en el proceso de fundición por precisión gracias a que se obtuvo una pieza final con una superficie apta y forma deseada. Para cumplir este objetivo, se debe modificar las dimensiones del diseño en CAD para tener en cuenta las contracciones que se generan en cada etapa del proceso.

6. RECOMENDACIONES

- ◆ Para diseños con partes delgadas y de poco espesor, sería posible usar otro tipo de impresora 3D u otro material, que tuviera una forma de deposición diferente a la de “RepRap” para obtener una mayor exactitud en las dimensiones de partes delgadas.
- ◆ En el momento de colar la cera en el molde de silicona, se recomienda que se realice en vacío.
- ◆ Estudiar la composición química de aleaciones más comerciales para la fundición para tener en cuenta su contracción y/o colar con ayuda de la fuerza centrífuga para tener mejor llenado del molde.
- ◆ Se puede realizar una práctica en la materia de “procesos de fundición” para los estudiantes de la Universidad Industrial de Santander, con el objetivo de mostrarles el proceso de fundición de cera perdida y su implementación con la impresión 3D.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JASON WEBB, “Lost ABS experiment with 3D-printed objects and aluminum casting”. [Online]. Available: <http://jason-webb.info/2012/11/lost-abs-experiment-with-3d-printed-objects-and-aluminum-casting/>. [Accessed: 13-Nov-2017].
- [2] GNAU, T. “Summit: 3D printing will bring factories of future”, Dayton Daily News (OH), 2016.
- [3] Anonymous Casting sales to increase as economy recovers, Mod. Cast. 101(1), pp. 26-30. Available: <https://search.proquest.com/docview/847559001?accountid=29068>, 2011.
- [4] PATTNAIK, S., KARUNAKAR, D., & JHA, P., “Developments in investment casting process” - A review. Journal Of Materials Processing Technology, 212(11), 2332-2348. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003, 2012.
- [5] SANCHEZ, C., CORTÉS J., “Rapid casting y nuevas tecnologías en el proceso de microfundición” - Revista ingeniería e investigación vol. 26 no.1., 2016.
- [6] GRIFFEY, J., “3-D Printers for Libraries”. Chicago, IL: ALA TechSource, 2012.
- [7] A. LANZOTTI et al, “The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer”, Rapid Prototyping Journal 21(5), pp. 604-617, 2015.

- [8] M. MACKŮ, M. HORÁČEK, “Applying RP-FDM Technology to Produce Prototype Castings Using the Investment Casting Method”. Polonia, Archives of Foundry Engineering, Vol 12, Iss 3, Pp 75-82, 2012.
- [9] FREEMANWAX, Waxes flakes, [Online], Available: <http://www.freemanwax.com/freeman-flakes-injection-waxes.html>. [Accessed: 4-Dec-2018]
- [10] Ransom & Randolph, Cermic Powde, [Online], Available: <https://www.ransom-randolph.com/bandust-technology>. [Accessed: 4-Dec-2018]
- [11] S. COATINGS. “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens 1”, vol. 11, no. Reapproved, pp. 1-12, 2017.
- [12] CONSHOOCKEN. “Standard Practice for Microetching Metals and Alloys 1,” vol. 7, no. Reapproved 2015, pp. 1–22, 2017.
- [13] ISO 286-1:2010, “Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits, Second edition 2010-04-15, 2011.
- [14] Anatolii Klopoto, Yuri Ivano, Viktor Vlaso, Nikolai Dedo and Oleg Loskuto, “Phase Transformations in the System Cu-Zn-Al under Conditions Far from Equilibrium”, A review. *Advanced Materials in Technology and Construction*, 030004 (2016); doi: 10.1063/1.4937826, 2015.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Bassoli, E. and Atzeni, E., "Direct metal rapid casting: Mechanical optimization and tolerance calculation". *Rapid Prototyping Journal*. 15: 238-243, 2007.
- Janc Mirko, "Comparative Study of 3D Printing Technologies for Rapid Casting of Aluminium Alloy", Department of Mechanical Engineering, Beant College of Engineering and Technology. India, *Materials and Manufacturing Processes*, 24: 1405–1411, 2009.
- Karwiński A, Haratym R, Soroczyński A, Kowalski P, "Comparison of Quality of Investment Castings Produced Based on the Rapid Prototyping Techniques with Products of Powder Sintering". Polonia, *Archives of Foundry Engineering*, Vol 14, Iss3, Pp 31-34, 2014.
- Komaragiri, S. K. B., "Effects of complex geometry, shell thickness and firing regimes on shell cracking in investment casting shells during rigid polymer pattern removal", 1523721 M.S., Missouri University of Science and Technology, 2013.
- Sarojrani Pattnaik, "Influence of sawdust on the properties of the ceramic shell used in investment casting process". London, *Int J Adv Manuf Technol* 93:691–707, 2017.
- Songhao Wang, Chinwang Shih, and Xinyin He, "A Study on Investment Casting Directly with Plastic Rapid Prototype Patterns". USA, *Journal of Materials Science and Engineering*, ISSN 1934-8959, 2010.

Żuczek, R., Pysz, S., Karwiński, A., Piekło, J., Kowalski, P., “Application of computers and rapid prototyping technique as an element of the cost-effective process of casting manufacture”. Proceedings of 69 World Foundry Congress, Chiny, Hangzou, October, pp. 691-696; 2010.

Anexo B. Ficha técnica de la cera.



Technical Data Sheet

Freeman Aqua Green Flake Wax

Description

This all-purpose injection wax is our most popular formula, as it provides the ideal balance of characteristics demanded by most designers and casters. Freeman Aqua offers excellent flow and flexibility for injecting intricate molds. It features minimal shrinkage for injecting larger molds and is also recommended for stone-in-place casting.

Physical Properties

| | |
|----------------------------------|---------------|
| Color | Aqua |
| Ring & Ball Softening Point (°F) | 158 (+/-6) |
| Injection Temperature (°F) | 160 |
| Congeaing Temperature (°F) | 141 |
| Flash Point (°F) | 465 |
| Hardness (Shore D) | 32 |
| Specific Gravity | 0.9 (+/-0.05) |
| Ash Content | 0.009% |
| Viscosity (cps) | |
| @ 170°F | 231 |
| @ 160°F | 289 |
| @ 150°F | 395 |

Ordering Information

| SKU | Description | Size | Net wt. |
|--------|---------------------------------|------|---------|
| 118176 | Freeman Flakes Wax – Aqua Green | 1 LB | 1 LB |

The user shall determine the suitability of this product for their application and assumes all risks and liabilities associated with the use of this product. The exclusive remedy for all proven claims is replacement of our materials only and in no event shall Freeman Mfg. & Supply Co. be liable for special, incidental, or consequential claims.

READ SAFETY DATA SHEETS AND PRODUCT LABELS BEFORE USING PRODUCT

Anexo C. Resultado de las medidas de las dimensiones del modelo en PLA, la cera y la pieza metálica.

Tabla a. Dimensiones del modelo impreso en PLA

| Dimensión | 1 (mm) | 2 (mm) | 3 (mm) | 4 (mm) | Promedio (mm) |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------------|
| D | 99,82 | 99,81 | 99,88 | 99,83 | 99,84 |
| d | 29,95 | 30,01 | 29,92 | 29,98 | 29,97 |
| h | 60,03 | 60,01 | 59,99 | 60,05 | 60,02 |
| t | 2,19 | 2,25 | 2,21 | 2,28 | 2,23 |

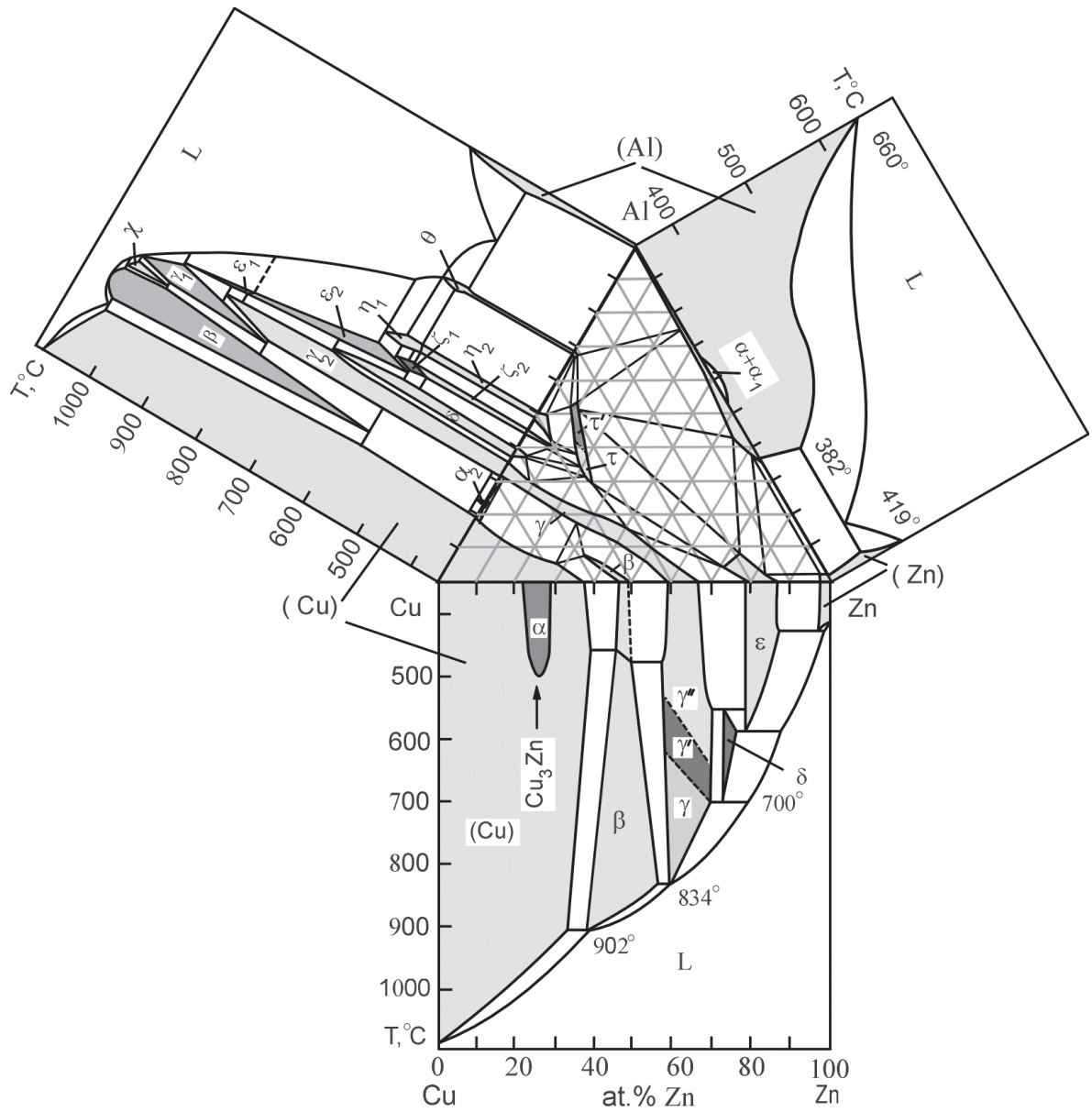
Tabla b. Dimensiones del modelo en cera

| Dimensión | 1 (mm) | 2 (mm) | 3 (mm) | 4 (mm) | Promedio (mm) |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------------|
| D | 97,64 | 97,17 | 97,74 | 97,84 | 97,60 |
| d | 29,64 | 29,66 | 29,77 | 29,65 | 29,68 |
| h | 58,16 | 58,42 | 58,13 | 58,26 | 58,24 |
| t | 2,22 | 2,2 | 2,21 | 2,14 | 2,19 |

Tabla c. Dimensiones de la pieza metálica

| Dimensión | 1 (mm) | 2 (mm) | 3 (mm) | 4 (mm) | Promedio (mm) |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------------|
| D | 96,89 | 96,51 | 96,72 | 96,92 | 96,76 |
| d | 29,14 | 29,15 | 29,26 | 29,25 | 29,20 |
| h | 57,5 | 57,1 | 57,23 | 57,18 | 57,25 |
| t | 2,12 | 2,17 | 2,2 | 2,13 | 2,16 |

Anexo D. Diagramas binarios de los sistemas Al-Cu, Al-Zn, Cu-Zn y sección isotérmica del sistema ternario Al-Cu-Zn a 350 °C [14].



Anexo E. Perfil de rugosidad superficial para el modelo en cera a 280x. a) cara superior y b) lado-base.

